

И. А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СВОБОДНЫМ И СВЯЗАННЫМ АБРАЗИВОМ**

*Получены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом с позиции теории вероятностей упрощенным методом расчета. Показано, что разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга существенно ограничивает возможности достижения требуемой шероховатости поверхности при шлифовании по сравнению с обработкой свободным абразивом. Основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании являются уменьшение зернистости круга, создание на круге примерно одновысотного расположения зерен, наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости.*

**Ключевые слова:** обработка свободным абразивом, шлифование, шероховатость поверхности, одновысотное расположение зерен, зернистость круга, режим резания

*Отримано аналітичні залежності для визначення шорсткості поверхні при обробці вільним і зв'язаним абразивом з позиції теорії ймовірностей спрощеним методом розрахунку. Показано, що різновисотне розташування зерен на робочій поверхні круга суттєво обмежує можливості досягнення необхідної шорсткості поверхні при шліфуванні порівняно з обробкою вільним абразивом. Основними умовами зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні є зменшення зернистості круга, створення на кругі приблизно одновисотного розташування зерен, наклеювання на робочу поверхню круга шару абразивного порошку невеликої зернистості.*

**Ключові слова:** обробка вільним абразивом, шліфування, шорсткість поверхні, одновисотне розташування зерен, зернистість круга, режим різання

*Analytical dependence for determining the surface roughness of the processing of free and bound abrasive with the position of the theory of probability a simplified method of calculation. It is shown that the location of different height grains on the working surface of a circle substantially limits the ability to achieve the required surface roughness when grinding as compared to treatment with free abrasive. The main terms of reducing the surface roughness is a reduction in grinding grain circle, creating the circle around the location odnovysotnogo grains sticking to the working surface of the circle a little abrasive powder grain layer.*

**Keywords:** free abrasive machining, grinding, surface roughness, odnovysotnoe location grains, grain range, cutting mode

**Постановка проблемы.** Обеспечение высококачественной обработки деталей машин является важнейшим условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Как известно, параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей деталей формируются на финишных операциях абразивной обработки, осуществляемых методами обработки свободным и связанным абразивом. Наибольшими технологическими возможностями с точки зрения обеспечения качества обработки располагает обработка свободным абразивом. Поэтому

операциям обработки свободным абразивом (доводке, полированию и т.д.) всегда предшествуют операции обработки связанным абразивом (шлифование, хонингование, суперфиниширование и т.д.), поскольку лишь на этих операциях можно достичь высоких показателей качества обработки, например, шероховатость поверхности на уровне  $R_a \leq 0,05$  мкм. Вместе с тем, операции обработки свободным абразивом характеризуются наибольшей трудоемкостью, уменьшить которую можно главным образом путем перехода на обработку связанным абразивом. Однако для этого необходимо обеспечить такие же показатели качества обработки, как и при обработке свободным абразивом. В некоторых случаях это удастся, например, достичь при шлифовании шероховатость поверхности на уровне  $R_a = 0,05-0,1$  мкм и исключить из технологического процесса обработку свободным абразивом, что резко снижает трудоемкость обработки. Однако в большинстве случаев шлифование гарантированно не обеспечивает таких высоких показателей качества обработки, поэтому приходится применять трудоемкую обработку свободным абразивом. В связи с этим, актуально решение задачи изыскания технологических возможностей повышения качества обработки при шлифовании и в особенности уменьшения шероховатости поверхности до уровня  $R_a = 0,05$  мкм и менее.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросам исследования шероховатости поверхности при абразивной обработке в научно-технической литературе уделено большое внимание [1-4]. Разработаны эффективные технологические процессы обработки свободным и связанным абразивом и практические рекомендации по их применению. Разработаны методы аналитического определения параметров шероховатости поверхности, что позволяет научно обоснованно подойти к выбору оптимальных условий обработки, обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности. Их применение позволяет решить актуальную задачу уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании до уровня, достигаемого при обработке свободным абразивом, с целью снижения трудоемкости обработки. Поэтому в работе решается задача анализа технологических возможностей обработки свободным и связанным абразивом с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании. В основу работы положены результаты теоретических исследований шероховатости поверхности, приведенные в работах [1-3].

**Цель работы** – обоснование условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании до уровня, достигаемого при обработке свободным абразивом, для снижения трудоемкости обработки.

**Основной материал.** В работе [5] установлено, что при одновысотном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-

абразивного инструмента, т.е. при доводке, на обрабатываемой поверхности в процессе резания образуется шероховатый слой, который математически может быть описан вероятностной функцией – относительной опорной длиной микропрофиля обработанной поверхности

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

где  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $n$  – суммарное количество абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности;  $B$  – ширина обработки, м;  $y$  – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

По физической сути вероятностная функция  $\Phi(y)$  определяет долю неснятого материала в шероховатом слое обработанной поверхности по координате  $y$ . Как видно, с увеличением  $y$  функция  $\Phi(y)$  уменьшается и при условии  $y = R_{\max}$  принимает значение, близкое к нулю, где  $R_{\max}$  – максимальная высота микронеровностей обработанной поверхности (стандартный параметр шероховатости поверхности), м.

При условии  $y=0$  функция  $\Phi(y=0)=1$ , т.е. на этом уровне весь материал не снят абразивными зернами. При условии  $y = R_{\max}$  функция  $\Phi(y = R_{\max}) = \Phi_0$ , где  $\Phi_0$  может принимать значения, равные 0,1; 0,05; 0,01 и менее, поскольку функция  $\Phi(y)$  является вероятностной и не может быть равна нулю. Тогда, потенцируя зависимость (1), с учетом  $y = R_{\max}$  и  $\Phi(y = R_{\max}) = \Phi_0$  получено:

$$R_{\max} = -\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (2)$$

В зависимости (2) функция  $\ln \Phi_0$  отрицательна, а параметр шероховатости поверхности  $R_{\max}$  принимает положительные значения.

Как видно, уменьшить  $R_{\max}$  можно главным образом за счет увеличения суммарного количества абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности  $n = k \cdot B \cdot l$ , где  $k$  – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт./м<sup>2</sup>;  $l$  – длина рабочей части инструмента, участвующая в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности, м.

После преобразования зависимость (2) принимает вид:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi_0}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot l} . \quad (3)$$

Исходя из зависимости (3), уменьшить  $R_{max}$  можно увеличением двух параметров –  $k$  и  $l$ .

В работе [5] также установлено, что в случае разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента (а это имеет место при шлифовании), вероятностная функция  $\Phi(y)$  описывается следующей зависимостью

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot \frac{y^2}{2b}} , \quad (4)$$

где  $b$  – максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки инструмента (шлифовального круга), м.

Потенцируя зависимость (4), с учетом  $y = R_{max}$  и  $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$  получено:

$$R_{max} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B \cdot b}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}} . \quad (5)$$

Как видно, зависимость (5) принципиально отличается от аналогичной зависимости (2). Это связано с наличием в ней параметра  $b$ , который может изменяться в широких пределах, вызывая увеличение параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$ .

Для количественной оценки значений параметра  $R_{max}$ , полученных при одновысотном и разновысотном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента, обозначим в зависимости (2) параметр  $R_{max} = R_{max1}$ , а в зависимости (5) –  $R_{max} = R_{max2}$ . Представляя

зависимость (2) в виде  $-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} = 2 \cdot R_{max1}$ , и подставляя ее в зависимость (5), получено:

$$R_{max2} = \sqrt{2 \cdot R_{max1} \cdot b} . \quad (6)$$

В табл. 1 и на рис. 1 приведены рассчитанные на основе зависимости (6) значения  $R_{max2}$  для разных значений  $R_{max1}$  и  $b$ .

Таблица 1 – Расчетные значения  $R_{max2}$  (в мкм)

$R_{max1}$ , мкм	0,05	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
$R_{max2}$ (для $b=2$ мкм)	0,447	0,632	1,414	2,0	2,5	2,828
$R_{max2}$ (для $b=5$ мкм)	0,707	1,0	2,236	3,162	3,878	4,472
$R_{max2}$ (для $b=10$ мкм)	1,0	1,414	3,162	4,472	5,477	6,328
$R_{max2}$ (для $b=20$ мкм)	1,141	2,0	4,472	6,325	7,746	8,944

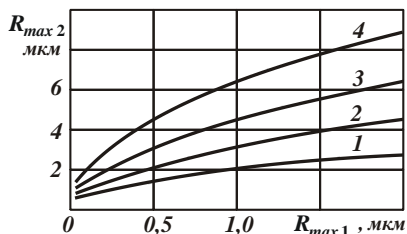


Рисунок 1 – Зависимость параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  от  $R_{max1}$  :

1 –  $b=2$  мкм; 2 –  $b=5$  мкм; 3 –  $b=10$  мкм; 4 –  $b=20$  мкм

Из табл. 1 следует, что параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  принимает значения, значительно превышающие значения  $R_{max1}$ . Этим объясняется то, что при шлифовании в связи с разновысотным расположением зерен на рабочей поверхности шлифовального круга параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  принимает весьма большие значения, несоизмеримые со значениями  $R_{max1}$ , достигаемыми в процессе доводки (обработки свободным абразивом) при одних и тех же значениях параметров  $n$  и  $B$ . Поэтому основным путем уменьшения  $R_{max2}$  следует рассматривать уменьшение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, т.е. уменьшения параметра  $b \rightarrow 0$ . Это достигается созданием на рабочей поверхности круга плосковершинных зерен за счет их затупления алмазным правящим карандашом [6]. Обеспечить фактически одновысотное расположение зерен можно электрогальваническим осаждением абразивных или алмазных зерен на рабочую поверхность круга. Уменьшить параметр  $b$  можно также изготовлением абразивных или алмазных кругов из зерен одного размера и т.д.

Разновысотное участие абразивных зерен в резании может быть обусловлено как разновысотным расположением зерен на рабочей

поверхности инструмента, так и режимом обработки. Например, при одновысотном расположении зерен на рабочей поверхности инструмента и в условиях доводки с радиальной подачей происходит разновысотное участие  $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$  абразивных зерен в резании, где  $V_{инстр}$  – скорость перемещения алмазно-абразивного инструмента, м/с;  $S$  – скорость радиальной подачи, м/с;  $\tau$  – время, в течение которого происходит радиальная подача на величину  $R_{max1}$ .

Подставляя параметр  $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$  в зависимость (2), получено

$$R_{max1} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot S}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инстр}}} . \quad (7)$$

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением  $S/V_{инстр}$ : чем оно больше, тем больше  $R_{max1}$ . Поэтому уменьшить  $R_{max1}$  можно уменьшением отношения  $S/V_{инстр}$  за счет уменьшения  $S$  или увеличения  $V_{инстр}$ .

Как видно, в процессе доводки имеет место разновысотное участие абразивных зерен в резании, что приводит к увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_{max1}$ . Основным условием уменьшения  $R_{max1}$  следует рассматривать осуществление процесса доводки без радиальной подачи за счет создания начального натяга в технологической системе и применения процесса выхаживания. Очевидно, осуществление доводки с радиальной подачей (по жесткой или упругой схемам) увеличивает параметр шероховатости поверхности  $R_{max1}$  в соответствии с зависимостью (7).

Сравнивая аналогичные зависимости (3) и (7), видно, что в случае разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности инструмента за счет увеличения параметра  $l$  при доводке проще добиться требуемой шероховатости поверхности, чем в случае разновысотного участия абразивных зерен в резании, где шероховатость поверхности определяется отношением  $S/V_{инстр}$ . Следовательно, применение радиальной подачи при доводке ограничивает возможности уменьшения шероховатости поверхности, т.е. доводку необходимо производить без радиальной подачи, например, реализуя упругую схему с заданным начальным натягом в технологической системе (схему выхаживания). Это позволит в максимальной степени использовать потенциальные возможности процесса доводки в плане достижения требуемой шероховатости поверхности.

К еще большему увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_{max2}$  приводит осуществление процесса шлифования с радиальной подачей. В этом случае количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности определяется зависимостью  $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot R_{max2} / V_{дет}$  (рис. 2), где  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$  – скорости круга и детали, м/с. Подставляя это выражение в зависимость (5), имеем

$$R_{max2} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot R_{max2}}} . \quad (8)$$

Откуда

$$R_{max2} = \sqrt[3]{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} . \quad (9)$$

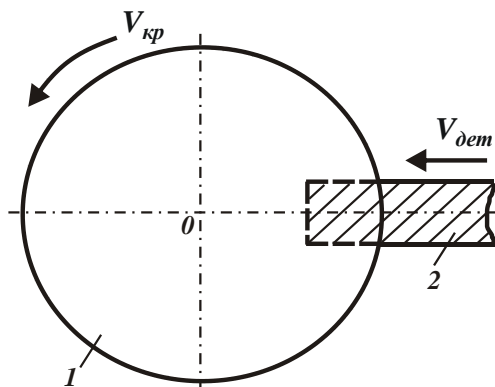


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса шлифования:  
1 – круг; 2 – деталь

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением  $V_{дет} / V_{кр}$ : чем оно больше, тем больше  $R_{max2}$ . Уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  можно, прежде всего, уменьшением радиальной подачи  $S$ . Наиболее просто это осуществить в условиях шлифования по упругой схеме с заданным радиальным усилием. Это обеспечивает минимальные значения  $S$  и соответственно минимальные значения параметра шероховатости поверхности  $R_{max2}$ .

С учетом известных соотношений [7]:  $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ ;  $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$

зависимость (9) примет вид:

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{-\frac{200 \cdot \pi \cdot \ln \Phi_0 \cdot V_{det}}{3 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}, \quad (10)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация зерен круга (для 100%-й концентрации алмазного круга –  $m=100$ );  $(1 - \varepsilon)$  – безразмерная величина, определяющая степень выступания режущих зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...0,5.

Исходя из зависимости (10), уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  при шлифовании можно главным образом за счет уменьшения зернистости круга  $\bar{X}$ , а также за счет уменьшения  $V_{det}$  и увеличения  $m$  и  $V_{кр}$ .

Как показывает практика, изготовление шлифовального круга с весьма малой зернистостью (например, алмазного круга зернистостью 5/3) вызывает значительные технические сложности. Поэтому и реализация значений параметра шероховатости поверхности на уровне  $R_{max} = 0,1$  мкм при шлифовании фактически невозможна. В этих условиях эффективно применение обработки свободным абразивом, о чем свидетельствуют результаты расчетов, приведенные в табл. 1, согласно которым можно гарантированно обеспечить высокие показатели шероховатости поверхности. Основным условием применения процесса шлифования с целью уменьшения шероховатости поверхности следует рассматривать притупление вершин абразивных зерен и установление их примерно одновысотного выступания над уровнем связки круга. Учитывая то, что шлифование, как правило, осуществляется с поперечной подачей, параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  в этом случае будет определяться зависимостью (7), которая в отличие от зависимости (9) приводит к меньшей шероховатости поверхности.

Таким образом, основным условием уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании является снижение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга. Одним из эффективных решений в этом направлении следует рассматривать наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости или же увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью  $B \cdot l$  (например, при обработке отверстий), что позволит существенно увеличить количество одновременно работающих зерен  $n = k \cdot B \cdot l$ , участвующих в формировании шероховатости поверхности.



Необходимо отметить, что аналогичные зависимости для определения параметров шероховатости поверхности были получены в работе [3] другими методами расчета. Это указывает на их достоверность. Принимая значение  $\Phi_0=0,001$ , имеем  $\ln\Phi_0=-4,6$ . После подстановки этого значения в (10) получена зависимость

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{307 \cdot \pi \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}, \quad (11)$$

которая отличается от аналогичной зависимости, приведенной в работе [3], лишь множителем, равным 1,13. Следовательно, предложенный в настоящей работе подход к определению параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  позволяет существенно упростить расчеты и получить зависимости, аналогичные известным зависимостям, что открывает новые возможности анализа и оптимизации условий абразивной обработки по критерию наименьшей шероховатости поверхности.

Полученные теоретические решения использованы при разработке эффективных финишных операций абразивной обработки. Установлено, что применение мелкозернистых абразивных кругов, обладающих повышенной режущей способностью, позволяет в ряде случаев уменьшить шероховатость поверхности до уровня  $R_a=0,05$  мкм и произвести замену трудоемкой обработки свободным абразивом.

**Выводы.** В работе получены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом с позиции теории вероятностей упрощенным методом расчета. Теоретически показано, что разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга существенно ограничивает возможности достижения требуемых показателей шероховатости поверхности при шлифовании по сравнению с процессами обработки свободным абразивом. Основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании являются уменьшение зернистости круга, создание на круге примерно одновысотного расположения зерен, наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости, увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Показано, что добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании за счет регулирования параметрами режима резания фактически невозможно в связи с ограниченностью пределов их изменения. Большими возможностями в этом плане располагает применение схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, т.е. схема выхаживания. Показано, что при обработке свободным абразивом с поперечной подачей эффективно

использовать упругую схему с фиксированной поперечной подачей, которая обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности.

**Список использованных источников:** 1. *Королев А.В.* Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / *А.В. Королев, Ю.К. Новоселов.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 320 с. 2. *Евсеев Д. Г.* Физические основы процесса шлифования / *Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с. 3. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / *Ф.В. Новиков.* – Одесса, 1995. – 36 с. 4. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / *Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Ченовецкий.* – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с. 5. *Новиков Ф.В.* Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности / *Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий* // Вісник НТУ “ХПІ”. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2004. – № 44. – С. 140-149. 6. *Дитиненко С.А.* Повышение эффективности технологии финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / *С.А. Дитиненко.* – Харьков, 2005. – 20 с. 7. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. *А.Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Korolev A.V.* Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoy obrabotki / *A.V. Korolev, Y.K. Novoselov.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1989. – 320 s. 2. *Evseev D.G.* Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniya / *D.G. Evseev, A.I. Salnikov.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1978. – 128 s. 3. *Novikov F.V.* Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 “Protssessy mekhanitheskoey obrabotki, stanki i instrumenty” / *F.V. Novikov.* – Odessa, 1995. – 36 s. 4. Kathestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke / *E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilitskiy, I.K. Thepovetskiy.* – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 244 s. 5. *Novikov F.V.* Issledovaniya sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teorii veroyatnosti / *F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy* // Visnyk NTU “KPI”, 2004. – № 44. – S. 140-149. 6. *Ditinenko S.A.* Povyshenie effektivnosti tekhnologiy finishnoy obrabotki tsilindricheskikh poverkhnostey tverdosplavnykh izdeliy: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya” / *S.A. Ditinenko.* – Kharkov, 2005. – 20 s. 7. *Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravothnik* / Pod red. prof. *A.N. Reznikova.* – M.: Mashinostroenie, 1977. – 390 s.